

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra mechaniky konstrukcí

Geometricky nelineární analýza rozhledny

Geometrically nonlinear analysis of the view-tower

Student:

Kristýna Duží

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Lenka Koubová, Ph.D.

Ostrava 2018

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra stavební mechaniky

Zadání bakalářské práce

Student: **Kristýna Duží**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607R037 Konstrukce staveb
Téma: **Geometricky nelineární analýza rozhledny**
Geometrically nonlinear analysis of the view-tower
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Student vypracuje geometricky nelineární analýzu rozhledny. Při řešení bude využita obecná deformační metoda. V rámci bakalářské práce provede srovnání analytických výpočtů s výsledky z numerického modelování.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] BENDA, J. Statika stavebních konstrukcí II. CERM, s.r.o. Brno, 1993. ISBN 80-7204-025-1.
- [2] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemní staveb, ČNI.
- [3] KADLČÁK, J., KYTÝR, J. Statika stavebních konstrukcí II. VUTUM, Brno 2001.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Lenka Koubová, Ph.D.**

Datum zadání: 31.10.2017
Datum odevzdání: 04.05.2018



doc. Ing. Martin Krejsa, Ph.D.
vedoucí katedry



prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracovala samostatně pod vedením vedoucí bakalářské práce a uvedla jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne.....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на вѣдомі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucí bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mě požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на вѣдомі, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne.....

.....

podpis studenta

Jméno a příjmení autora práce:

Kristýna Duží

Adresa trvalého pobytu autora práce:

Podříčí 107, Frenštát pod Radhoštěm, 744 01



ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

DUŽÍ, K. *Nelineární řešení příhradové konstrukce rozhledny: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB –Technická univerzita Ostrava, Fakulta stavební, Katedra mechaniky konstrukcí, 2018, Vedoucí práce: Ing. Lenka Koubová, Ph.D.

Bakalářská práce je zaměřena na vytvoření algoritmu pro výpočet prostorové příhradové konstrukce obecnou deformační metodou se zahrnutím vlivu geometrické nelinearity. Výpočet je možné po změně zadání konstrukce použít pro jakoukoliv ocelovou nebo dřevěnou prostorovou příhradovou konstrukci. Součástí práce je popis vytvoření programu a ukázka výpočtu s grafickými výstupy reálné ocelové konstrukce rozhledny a také její nahrazení konstrukcí dřevěnou.

Klíčová slova

Obecná deformační metoda, nelineární výpočet, příhradová konstrukce, Matlab

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

DUŽÍ, K. *Geometrically nonlinear analysis of the view-tower: the bachelor thesis*. Ostrava: VŠB –Technical university Ostrava, Faculty of civil engineering, Department of mechanics of struss, 2018,

Head of work: Ing. Lenka Koubová, Ph.D.

The bachelor thesis is focused on the creation of algorithm for calculation of spatial truss by direct stiffness method with the inclusion of the influence of geometrical non-linearity. The calculation can be used for any steel or wooden girder construction after a change in design. Part of the thesis is a description of the creation of a program and a demonstration of calculation with graphical outputs of the real steel structure of the view-tower and its replacement with the wooden constructions.

Key words

Direct stiffness method, geometrical non-linear, truss, Matlab

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Seznam použitých značek a symbolů | 9 |
| 1 Cíl bakalářské práce | 10 |
| 2 Úvod..... | 11 |
| 3 Obecná deformační metoda | 12 |
| 3.1 Výpočtový model konstrukce | 12 |
| 3.2 Lokální a globální souřadný systém | 16 |
| 3.3 Postup výpočtu obecné deformační metody pro rovinné konstrukce | 16 |
| 3.3.1 Určení stupně přetvárné neurčitosti | 16 |
| 3.3.2 Lokální primární koncové síly jednotlivých prutů | 17 |
| 3.3.3 Výpočet lokálních sekundárních koncových sil | 18 |
| 3.3.4 Určení celkových lokálních koncových sil..... | 20 |
| 3.3.5 Transformace do globálního souřadného systému | 21 |
| 3.3.6 Matice tuhosti \mathbf{K} | 22 |
| 3.3.7 Vytvoření zatěžovacího vektoru \mathbf{F} | 22 |
| 3.3.8 Řešení rovnic | 22 |
| 3.3.9 Kontrola řešení | 22 |
| 3.4 Postup výpočtu obecné deformační metody pro rovinné příhradové konstrukce | 23 |
| 3.4.1 Určení stupně přetvárné neurčitosti | 23 |
| 3.4.2 Lokální primární koncové síly jednotlivých prutů | 23 |
| 3.4.3 Výpočet lokálních sekundárních koncových sil | 23 |
| 3.4.4 Transformace do globálního systému souřadnic | 24 |
| Pro získání globálního vektoru soustavy využijeme rovnici (3.18). | 24 |
| 3.4.5 Matice tuhosti \mathbf{K} | 24 |
| 3.4.6 Vytvoření zatěžovacího vektoru \mathbf{F} | 24 |
| 3.4.7 Řešení rovnic | 24 |
| 3.4.8 Normálové síly | 25 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 3.4.9 | Kontrola řešení | 25 |
| 3.5 | Postup výpočtu pro prostorové příhradové konstrukce | 25 |
| 3.5.1 | Určení stupně přetvárné neurčitosti | 25 |
| 3.5.2 | Lokální primární koncové síly jednotlivých prutů | 25 |
| 3.5.3 | Výpočet lokálních sekundárních koncových sil | 25 |
| 3.5.4 | Transformace do globálního systému souřadnic | 26 |
| 3.5.5 | Matice tuhosti konstrukce K | 27 |
| 3.5.6 | Vytvoření zatěžovacího vektoru F | 27 |
| 3.5.7 | Řešení rovnic | 27 |
| 3.5.8 | Normálové síly | 27 |
| 3.5.9 | Kontrola řešení | 27 |
| 4 | Základy nelineární mechaniky | 28 |
| 4.1 | Typy nelinearit..... | 28 |
| 4.1.1 | Konstrukční nelinearita..... | 28 |
| 4.1.2 | Fyzikální nelinearita | 28 |
| 4.1.3 | Geometrická nelinearita..... | 29 |
| 5 | Geometrická nelinearita v obecné deformační metodě | 30 |
| 5.1 | Teorie 2. řádu..... | 30 |
| 5.2 | Zavedení do výpočtu | 30 |
| 6 | Příklad ocelové příhradové konstrukce rozhledny | 31 |
| 6.1 | Reálná konstrukce rozhledny..... | 31 |
| 6.2 | Výpočetní model konstrukce | 32 |
| 6.3 | Vývojový diagram programu..... | 34 |
| 6.4 | Tvorba programu | 35 |
| 6.4.1 | Souřadnice uzlů konstrukce..... | 35 |
| 6.4.2 | Pruty | 36 |
| 6.4.3 | Vnější vazby | 37 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 6.4.4 | Zatížení | 38 |
| 6.4.5 | Matice tuhosti | 40 |
| 6.4.6 | Řešení soustavy rovnic | 42 |
| 6.4.7 | Osové síly | 42 |
| 6.4.8 | Změna geometrie | 43 |
| 6.4.9 | Výpočet normálových sil dle teorie 2. řádu..... | 44 |
| 6.4.10 | Deformovaná konstrukce..... | 44 |
| 6.5 | Porovnání lineárního a nelineárního výpočtu | 47 |
| 7 | Příklad nahrazení ocelové příhradové konstrukce rozhledny konstrukcí dřevěnou | 50 |
| 7.1 | Provedené změny v algoritmu pro dřevěnou konstrukci | 50 |
| 7.2 | Deformovaná konstrukce..... | 52 |
| 7.3 | Porovnání lineárního a nelineárního výpočtu | 53 |
| 8 | Závěr..... | 56 |
| | Seznam použité literatury | 57 |
| | Seznam příloh..... | 58 |

Seznam použitých značek a symbolů

| | |
|---------------------------|--|
| A | plocha průřezu |
| E | Youngův modul pružnosti v tahu a tlaku |
| F | zatížení, osamělá síla |
| \mathbf{K} | matice tuhosti soustavy |
| N | normálová síla |
| \mathbf{R}_{ab}^* | lokální vektor zatížení |
| $\bar{\mathbf{R}}_{ab}^*$ | lokální primární vektor zatížení |
| $\hat{\mathbf{R}}_{ab}^*$ | lokální sekundární vektor zatížení |
| \mathbf{T} | transformační matice |
| \mathbf{T}^T | transponovaná transformační matice |
| a | označení styčnicku počátečního bodu prutu |
| b | označení styčnicku koncového bodu prutu |
| \mathbf{k} | globální matice tuhosti |
| \mathbf{k}_{ab}^* | lokální matice prutu ab |
| \mathbf{k} | lokální matice tuhosti |
| l | délka prutu |
| m | hmotný bod |
| \mathbf{r}_{ab}^* | lokální vektor deformací prutu ab |
| u_a | vodorovný posun v ose x |
| v_a | vodorovný posun v ose y |
| w_a | svislý posun v ose z |
| x, y, z | souřadnice bodu, označení souřadnicové osy |
| α | označení úhlu |
| β | označení úhlu |
| γ | označení úhlu |
| φ | pootočení |

1 Cíl bakalářské práce

Cílem práce je vypracovat algoritmus v programu Matlab pro výpočet prostorové příhradové konstrukce za pomoci obecné deformační metody.

Jedná se o geometricky nelineární výpočet prutové soustavy dle teorie 2. řádu, která předpokládá malé deformace, tzn. deformace řádově menší, než jsou rozměry konstrukce, a podmínky rovnováhy sestavuje na deformované konstrukci.

Práce je zaměřena na určení normálových sil v jednotlivých prutech dle teorie 1. řádu, normálových sil dle teorie 2. řádu a určení potřebného počtu iterací pro výpočet normálových sil dle teorie 2. řádu se zadanou přesností.

Výpočet je použit pro ocelovou konstrukci rozhledny a dřevěnou konstrukci rozhledny stejné geometrie. Změnou zadání jej lze využít pro výpočet jakékoliv prostorové příhradové konstrukce z oceli nebo ze dřeva.

2 Úvod

Příhradová konstrukce je nosná prutová konstrukce. Jedná se o soustavu přímých prutů, které jsou svými konci spojeny ve styčnicích klouby. Pruty mají konstantní průřezy, různé pruty mohou mít různé průřezy. Soustava je zatížena pouze styčnickovým zatížením, tj. bodovými silami v místech kloubů. Soustava je podepřena proti posunutí ve styčnicích vnějšími vazbami. V prutech vznikají pouze normálové síly.

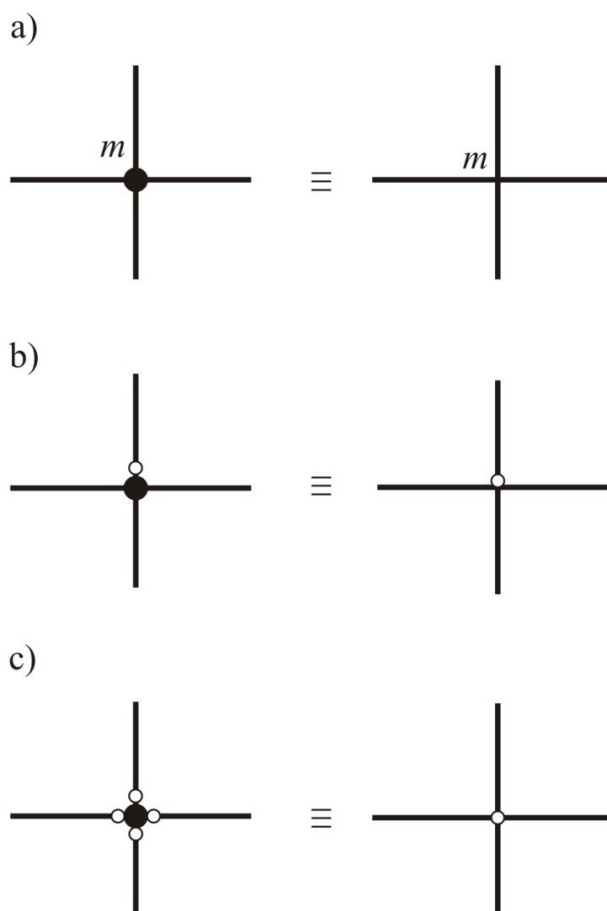
3 Obecná deformační metoda

Obecná deformační metoda se používá pro řešení staticky neurčitých konstrukcí. Jedná se o metodu nepřímou. Nejprve řešíme deformační stav prutové konstrukce, ve kterém jsou neznámými deformace (posunutí, pootočení), a z něj poté odvozujeme stav statický.

3.1 Výpočtový model konstrukce

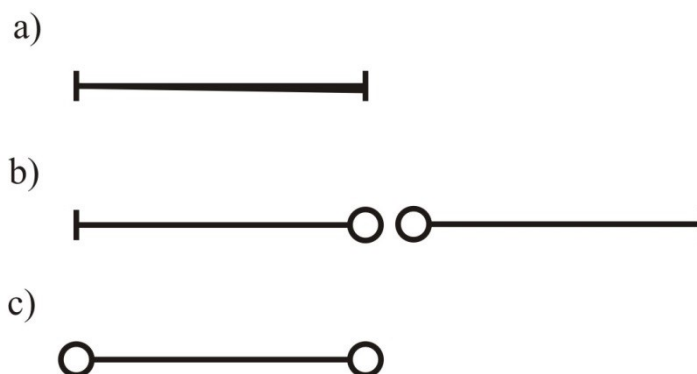
Soustava přímých prutů je nahrazena jejich střednicemi, kterým jsou přiřazeny geometrické charakteristiky prutů, průřezové charakteristiky a vlastnosti materiálu. Pruty jsou svými konci spojeny ve styčnících.

Každý styčník si představíme jako hmotný bod m obecně se třemi stupni volnosti (možnost dvou vodorovných posunů a svislého posunu). Styk prutů může být rámový (styčníky monolitické viz obr. 3.1a), rámový s kloubově připojeným prutem (viz obr. 3.1b) nebo nerámový (kloubové styčníky viz obr. 3.1c).



Obr. 3.1 – Druhy styčnicků [2]

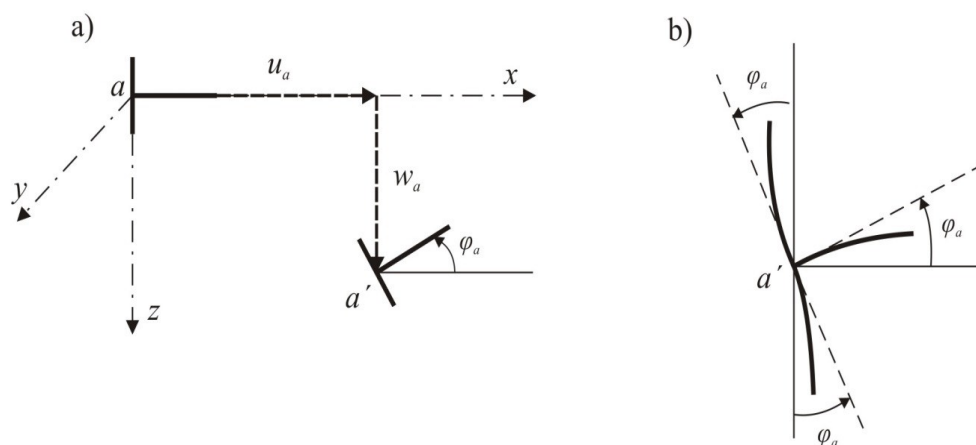
Podle druhu připojení rozdělujeme přímé pruty na oboustranně monoliticky připojené (viz obr. 3.2a), jednostranně kloubově připojené, které mohou být pravostranně kloubově připojené nebo levostranně kloubově připojené (viz obr. 3.2b) a oboustranně kloubově připojené (viz obr. 3.2c).



Obr. 3.2 – Druhy prutů [4]

Každý volný (nepodepřený) monolitický styčník a má v rovině tři složky přemístění, kterými jsou:

- vodorovný posun v ose x - posun u_a
- svislý posun v ose z - posun w_a
- pootočení v rovině soustavy xz – pootočení φ_a



Obr. 3.3 – Přemístění v rovině [2]

Volný (nepodepřený) monolitický styčnick a má v prostoru celkem šest složek přemístění, kterými jsou:

- vodorovný posun v ose x - posun u_a
- vodorovný posun v ose y - posun v_a
- svislý posun v ose z - posun w_a
- pootočení v rovině soustavy xy – pootočení φ_{xa}
- pootočení v rovině soustavy yz – pootočení φ_{ya}
- pootočení v rovině soustavy xz – pootočení φ_{za}

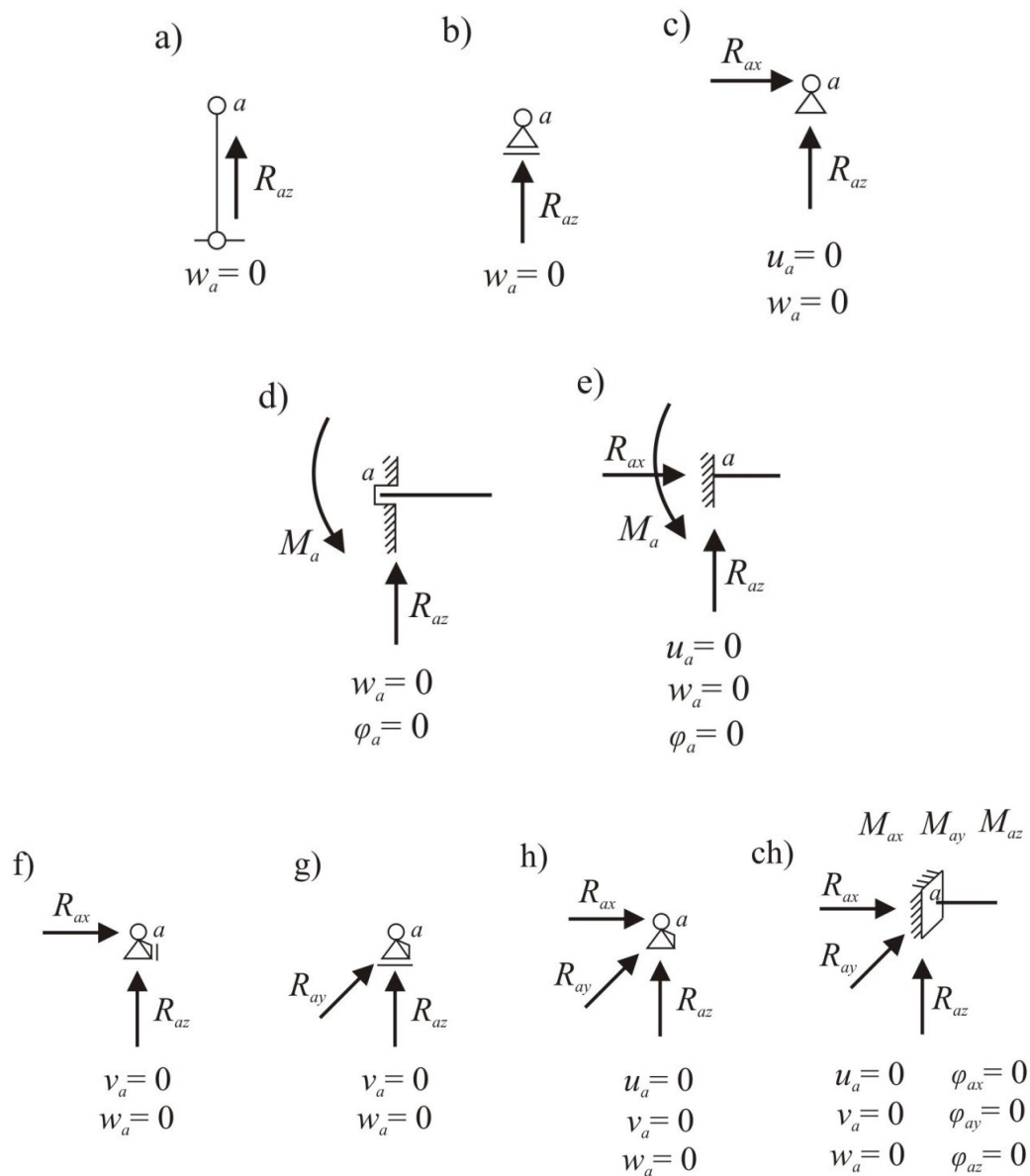
Kloubový volný styčnick (dokonalý kloub) umožňuje pootáčení v libovolné rovině.

Má tři nenulové složky posunutí, kterými jsou:

- vodorovný posun v ose x - posun u_a
- vodorovný posun v ose y - posun v_a
- svislý posun v ose z - posun w_a

Kloubové připojení prutu k monolitickému styčnicku má v prostoru více variant dle funkční roviny kloubu.

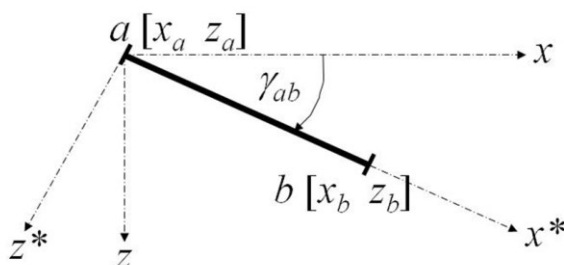
Vnější vazby zabraňují styčнику v posunutí a natočení prutu. Vazba může zamezovat posunutí v jednom nebo více směrech a zároveň dovolit natočení prutu (posuvný kloub, pevný kloub, kyvná stojka). Vazba zabraňující, jak posunutí v jednom nebo více směrech, tak natočení prutu, se nazývají vetknutím.



Obr. 3.4 – Typy podepření

3.2 Lokální a globální souřadný systém

Při výpočtech v obecné deformační metodě používáme dva souřadné systémy. Lokální souřadný systém platí pro jeden konkrétní prut. Globální souřadný systém platí pro celou konstrukci.



Obr. 3.5 – Souřadný systém [4]

x, z globální souřadný systém GSS platí pro celou konstrukci

x^*, z^* lokální souřadný systém LSS platí pro jeden prut

3.3 Postup výpočtu obecné deformační metody pro rovinné konstrukce

3.3.1 Určení stupně přetvárné neurčitosti

K určení stupně přetvárné neurčitosti, který odpovídá počtu neznámých přetvoření a rovnic, využíváme tzv. fiktivních vazeb viz obr. 3.6.



momentová (brání pootočení)



silová (brání svislému posunu)



silová (brání horizontálnímu posunu)

Obr. 3.6 – Fiktivní vazby [4]

Počty fiktivních vazeb použijeme v rovnici (3.1), kterou vypočítáme stupeň přetvárné neurčitosti.

$$n_p = 3t + 2k + p - p_v \quad (3.1)$$

n_p stupeň přetvárné neurčitosti

t počet monolitických styčníků

k počet kloubových styčníků

p počet jednoduchých kloubových podepření

p_v počet vnějších vazeb umístěných u styčníků

3.3.2 Lokální primární koncové síly jednotlivých prutů

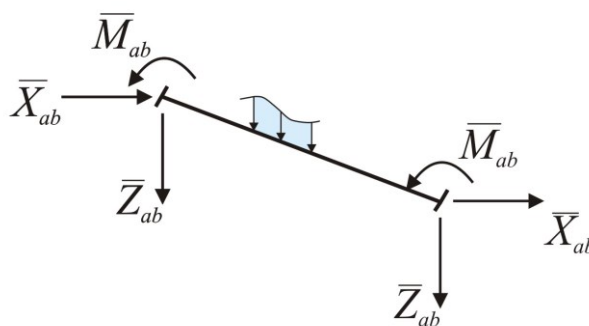
V primárním stavu změníme prut na oboustranně dokonale vetknutý nosník, čímž koncové uzly znehybníme.

Na prutu necháme působit zadané zatížení, které můžeme rozdělit na zatížení osově a příčně.

Pomocí silové metody vyřešíme primární koncové síly prutu. Pro různá zatížení jsou vytvořeny tabulky s řešením lokálního primárního vektoru prutu.

Lokální primární vektor prutu ab je znázorněn ve vektoru (3.2) a obrázku č. 3.7

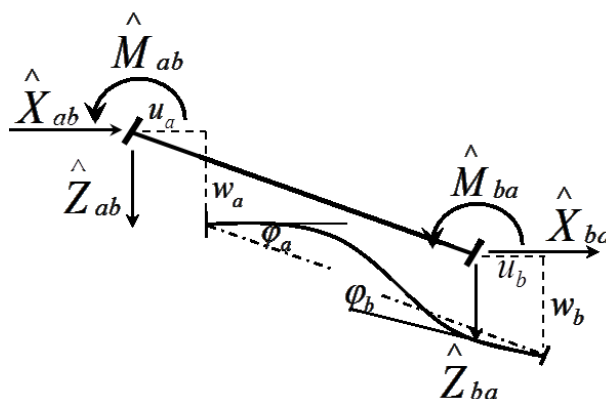
$$\bar{\mathbf{R}}_{ab}^* = (\bar{X}_{ab}^* \bar{Z}_{ab}^* \bar{M}_{ab}^* \bar{X}_{ba}^* \bar{Z}_{ba}^* \bar{M}_{ba}^*)^T \quad (3.2)$$



Obr. 3.7 – Primární složky sil [4]

3.3.3 Výpočet lokálních sekundárních koncových sil

V sekundárním stavu odstraníme zadané zatížení. Koncovým uzlům prutu zadáme složky přemístění, tj. deformační zatížení, které můžeme rozdělit na osově a příčné. V koncových bodech dojde k přetvoření, které se podílí na splnění podmínek rovnováhy v uzlech.



Obr. 3.8 – Sekundární složky sil [4]

Pomocí silové metody vyřešíme sekundární koncové síly prutu. Pro výpočet sekundárních lokálních sil prutu konstantního a neměnného průřezu využíváme rovnici (3.6).

$$\hat{\mathbf{R}}_{ab}^* = \mathbf{k}_{ab}^* * \mathbf{r}_{ab}^* \quad (3.6)$$

$\hat{\mathbf{R}}_{ab}^*$ sekundární vektor koncových sil

\mathbf{k}_{ab}^* lokální matice tuhosti prutu

\mathbf{r}_{ab}^* lokální vektor deformace prutu

$\hat{\mathbf{R}}_{ab}^*$ sekundární vektor koncových sil

\mathbf{k}_{ab}^* lokální matice tuhosti prutu

\mathbf{r}_{ab}^* lokální vektor deformace prutu

Lokální matice tuhosti prutu je pro různá připojení prutu odvozena. V maticích (3.7) až (3.10) jsou její hodnoty uvedeny s určením, o jaký typ připojení prutu se jedná.

V případě oboustranně monoliticky připojeného prutu vypadá maticový zápis následovně:

$$\mathbf{k}_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} & 0 & -\frac{12EI}{l^3} & -\frac{6EI}{l^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} & 0 & \frac{12EI}{l^3} & \frac{6EI}{l^2} \\ 0 & -\frac{6EI}{l^2} & \frac{2EI}{l} & 0 & \frac{6EI}{l^2} & \frac{4EI}{l} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Pro pravostranně kloubově připojený prut je lokální matice tuhosti prutu v matici (3.8). V místě kloubu (koncový styčník prutu) jsou prvky lokální matice tuhosti v posledním sloupci matice nulové. Koncový styčník nemá žádnou tuhost proti pootočení.

$$\mathbf{k}_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{l^3} & -\frac{3EI}{l^2} & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & 0 \\ 0 & -\frac{3EI}{l^2} & \frac{3EI}{l} & 0 & \frac{3EI}{l^2} & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EI}{l^3} & \frac{3EI}{l^2} & 0 & \frac{3EI}{l^3} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.8)$$

Pro levostranně kloubově připojený prut je lokální matice tuhosti uvedena v matici (3.9). Nyní je kloub na počátku prutu, proto je třetí sloupec matice nulový. Kloub nemá žádnou tuhost proti pootočení.

$$\mathbf{k}_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{3EI}{l^3} & 0 & 0 & -\frac{3EI}{l^3} & -\frac{3EI}{l^2} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{3EI}{l^3} & 0 & 0 & \frac{3EI}{l^3} & \frac{3EI}{l^2} \\ 0 & -\frac{3EI}{l^2} & 0 & 0 & \frac{3EI}{l^2} & \frac{3EI}{l} \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Pro oboustranně kloubově připojený prut je lokální matice prutu tuhosti uvedena v matici (3.10). Matice má pouze čtyři nenulové prvky. Může být zapsána i ve zkrácené verzi, ve které nejsou uvedeny nulové řádky a sloupce.

$$\mathbf{k}_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

3.3.4 Určení celkových lokálních koncových sil

Celkové koncové lokální síly dostaneme sečtením primárních a sekundárních lokálních koncových sil viz. rovnice (3.11)

$$\mathbf{R}_{ab}^* = \bar{\mathbf{R}}_{ab}^* + \hat{\mathbf{R}}_{ab}^* = \bar{\mathbf{R}}_{ab}^* + \mathbf{k}_{ab}^* * \mathbf{r}_{ab}^* \quad (3.11)$$

V maticovém zápisu viz. rovnice (3.12)

$$\begin{bmatrix} X_{ab}^* \\ Z_{ab}^* \\ M_{ab}^* \\ X_{ba}^* \\ Z_{ba}^* \\ M_{ba}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{X}_{ab}^* \\ \bar{Z}_{ab}^* \\ \bar{M}_{ab}^* \\ \bar{X}_{ba}^* \\ \bar{Z}_{ba}^* \\ \bar{M}_{ba}^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{X}_{ab}^* \\ \hat{Z}_{ab}^* \\ \hat{M}_{ab}^* \\ \hat{X}_{ba}^* \\ \hat{Z}_{ba}^* \\ \hat{M}_{ba}^* \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

3.3.5 Transformace do globálního souřadného systému

Transformační matice \mathbf{T}_{ab} vyjadřuje geometrickou závislost lokálních deformací na globálních. Používá se pro převod globálních parametrů do lokálních.

$$\mathbf{R}_{ab,lok} = \mathbf{T}_{ab} * \mathbf{R}_{ab,glob} \quad (3.13)$$

Pro výpočet cosinu a sinu směrového úhlu γ_{ab} potřebujeme znát délku prutu ab . Délku prutu vypočítáme dle rovnice (3.14).

$$l_{ab} = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2} \quad (3.14)$$

$$\cos \gamma_{ab} = \frac{x_b - x_a}{l_{ab}} \quad (3.15)$$

$$\sin \gamma_{ab} = \frac{y_b - y_a}{l_{ab}} \quad (3.16)$$

Pro případ rovinné konstrukce vypadá transformační matice následovně (3.17)

$$\mathbf{T}_{ab} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{ab} & \sin \gamma_{ab} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -\sin \gamma_{ab} & \cos \gamma_{ab} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \gamma_{ab} & \sin \gamma_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\sin \gamma_{ab} & \cos \gamma_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

Transponovaná transformační matice \mathbf{T}_{ab}^T je inverzní maticí k matici \mathbf{T}_{ab} a používá se pro převod lokálních parametrů do globálních.

$$\mathbf{R}_{ab,glob} = \mathbf{T}_{ab}^T * \mathbf{R}_{ab,lok} \quad (3.18)$$

$$\mathbf{T}_{ab}^T = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{ab} & -\sin \gamma_{ab} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin \gamma_{ab} & \cos \gamma_{ab} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \gamma_{ab} & -\sin \gamma_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin \gamma_{ab} & \cos \gamma_{ab} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

Pro výpočet globální matice tuhosti prutu využijeme jak transformační matici tak transponovanou transformační matici.

$$\mathbf{k}_{ab, glob} = \mathbf{T}_{ab}^T * \mathbf{k}_{ab, lok} * \mathbf{T}_{ab} \quad (3.20)$$

3.3.6 Matice tuhosti \mathbf{K}

Matici tuhosti \mathbf{K} celé konstrukce poskládáme z částí globálních matic tuhostí jednotlivých prutů \mathbf{k}_{ab} .

\mathbf{K} lokalizaci matice tuhosti \mathbf{K} využíváme kódových čísel.

3.3.7 Vytvoření zatěžovacího vektoru \mathbf{F}

Zatěžovací vektor \mathbf{F} tvoří pravou stranu lineárních rovnic. Vytvoříme jej pomocí rovnice (3.21).

$$\mathbf{F} = \mathbf{S} - \bar{\mathbf{R}} \quad (3.21)$$

\mathbf{F} zatěžovací vektor

\mathbf{S} vektor styčnickového zatížení

$\bar{\mathbf{R}}$ primární vektor soustavy

3.3.8 Řešení rovnic

Řešíme soustavu lineárních rovnic.

$$\mathbf{K} * \mathbf{r} = \mathbf{F} \quad (3.22)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{K}^{-1} * \mathbf{F} \quad (3.23)$$

3.3.9 Kontrola řešení

Řešení můžeme zkontrolovat pomocí podmínek rovnováhy ve styčnicích.

3.4 Postup výpočtu obecné deformační metody pro rovinné příhradové konstrukce

3.4.1 Určení stupně přetvárné neurčitosti

K určení stupně přetvárné neurčitosti nevyužíváme fiktivních vazeb. Postačí nám následující rovnice (3.24).

$$n_p = 2n_s - n_v \quad (3.24)$$

n_p stupeň přetvárné neurčitosti

n_s celkový počet styčníků

n_v počet jednoduchých vnějších vazeb

3.4.2 Lokální primární koncové síly jednotlivých prutů

V případě příhradové konstrukce nejsou pruty zatíženy, tudíž je lokální vektor primárních koncových sil nulový.

3.4.3 Výpočet lokálních sekundárních koncových sil

V případě příhradové konstrukce jsou nenulové pouze dva prvky lokálních sekundárních koncových sil. Sekundární koncové síly se rovnají celkovým lokálním koncovým silám.

$$\mathbf{R}_{ab}^* = \{X_{ab}^* X_{ba}^*\}^T \quad (3.25)$$

$$\mathbf{R}_{ab}^* = \mathbf{k}_{ab}^* * \mathbf{r}_{ab}^* \quad (3.26)$$

Lokální matice tuhosti je stejná jako (3.10).

Lokální matice tuhosti pro příhradovou konstrukci může být zapsána ve zkrácené verzi.

$$\mathbf{k}_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

3.4.4 Transformace do globálního systému souřadnic

Transformační matice je stejná jako (3.17).

Transformační matice pro příhradovou konstrukci může být zapsána ve zkrácené verzi.

$$\mathbf{T}_{ab} = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{ab} & \sin \gamma_{ab} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos \gamma_{ab} & \sin \gamma_{ab} \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Pro získání lokálního vektoru soustavy využijeme rovnici (3.13)

Transponovaná transformační matice je shodná s (3.19).

Transponovaná transformační matice může být taktéž zapsána ve zkrácené verzi.

$$\mathbf{T}_{ab}^T = \begin{bmatrix} \cos \gamma_{ab} & 0 \\ \sin \gamma_{ab} & 0 \\ 0 & \cos \gamma_{ab} \\ 0 & \sin \gamma_{ab} \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

Pro získání globálního vektoru soustavy využijeme rovnici (3.18).

Při výpočtu globální matice tuhosti prutu využijeme transformační matici i transformovanou transformační matici ve stejném vzorci jako je (3.20).

3.4.5 Matice tuhosti \mathbf{K}

Matici tuhosti \mathbf{K} celé konstrukce poskládáme z částí globálních matic tuhostí jednotlivých prutů \mathbf{k}_{ab} pomocí kódových čísel.

3.4.6 Vytvoření zatěžovacího vektoru \mathbf{F}

Zatěžovací vektor \mathbf{F} pro příhradovou soustavu je přímo roven vektoru styčnickového zatížení.

3.4.7 Řešení rovnic

Řešíme soustavu lineárních rovnic.

$$\mathbf{K} * \mathbf{r} = \mathbf{F} \quad (3.30)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{K}^{-1} * \mathbf{F} \quad (3.31)$$

3.4.8 Normálové síly

Normálové síly prutů prostorové příhradové konstrukce jsou lokální sekundární koncové síly na jednotlivých prutech.

$$\hat{X}_{ab}^* = \frac{EA}{l} u_a^* - \frac{EA}{l} u_b^* \quad (3.32)$$

$$\hat{X}_{ba}^* = -\frac{EA}{l} u_a^* + \frac{EA}{l} u_b^* \quad (3.33)$$

$$N = \hat{X}_{ab}^* = -\hat{X}_{ba}^* \quad (3.34)$$

3.4.9 Kontrola řešení

Řešení můžeme zkontrolovat pomocí podmínek rovnováhy ve styčnících.

3.5 Postup výpočtu pro prostorové příhradové konstrukce

3.5.1 Určení stupně přetvárné neurčitosti

K určení stupně přetvárné neurčitosti využíváme rovnici (3.35).

$$n_p = 3n_s - n_v \quad (3.35)$$

n_p stupeň přetvárné neurčitosti

n_s celkový počet styčníků

n_v počet jednoduchých vnějších vazeb

3.5.2 Lokální primární koncové síly jednotlivých prutů

V prostorové příhradové konstrukci stejně jako v rovinné jsou zatíženy pouze styčníky, tudíž je lokální vektor primárních koncových sil nulový.

3.5.3 Výpočet lokálních sekundárních koncových sil

Lokální sekundární síly jsou stejné jako v případě rovinné příhradové konstrukce. Sekundární koncové síly se rovnají celkových lokálním koncovým silám

$$\mathbf{R}_{ab}^* = \{X_{ab}^* X_{ba}^*\}^T \quad (3.36)$$

$$\mathbf{R}_{ab}^* = \mathbf{k}_{ab}^* * \mathbf{r}_{ab}^* \quad (3.37)$$

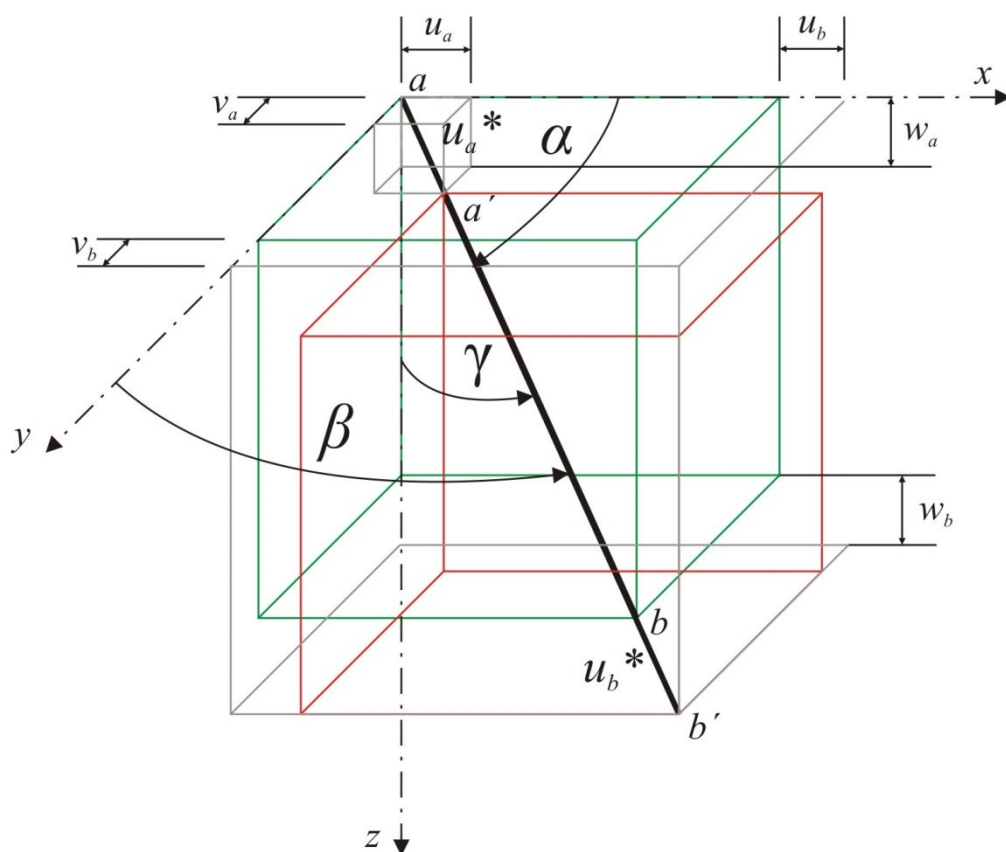
Lokální matice tuhosti je stejná jako (3.10).

Lokální matice tuhosti pro příhradovou konstrukci může být zapsána ve zkrácené verzi.

$$\mathbf{k}_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & -\frac{EA}{l} \\ -\frac{EA}{l} & \frac{EA}{l} \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

3.5.4 Transformace do globálního systému souřadnic

Pro určení transformační matice potřebujeme určit délku prutu ab a směrové úhly α, β, γ , které svírá prut se souřadnicovými osami.



Obr. 3.9 – Směrové úhly svírající prut se souřadnými osami v prostoru [4]

$$l = \sqrt{(x_b - x_a)^2 + (y_b - y_a)^2 + (z_b - z_a)^2} \quad (3.39)$$

$$\cos \alpha = \frac{x_b - x_a}{l} \quad (3.40)$$

$$\cos \beta = \frac{y_b - y_a}{l} \quad (3.41)$$

$$\cos \gamma = \frac{z_b - z_a}{l} \quad (3.42)$$

Transformační matice pro příhradovou konstrukci může být doplněna o nulové řádky nebo zapsána ve zkrácené verzi.

$$\mathbf{T}_{ab} = \begin{bmatrix} \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos \alpha & \cos \beta & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Transponovaná transformační matice může být také zapsána ve zkrácené verzi.

$$\mathbf{T}_{ab}^T = \begin{bmatrix} \cos \alpha & 0 \\ \cos \beta & 0 \\ \cos \gamma & 0 \\ 0 & \cos \alpha \\ 0 & \cos \beta \\ 0 & \cos \gamma \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

3.5.5 Matice tuhosti konstrukce \mathbf{K}

Matici tuhosti \mathbf{K} celé konstrukce poskládáme z částí globálních matic tuhostí jednotlivých prutů \mathbf{k}_{ab} pomocí kódových čísel.

3.5.6 Vytvoření zatěžovacího vektoru \mathbf{F}

Zatěžovací vektor \mathbf{F} pro příhradovou soustavu je přímo roven vektoru styčnickového zatížení.

3.5.7 Řešení rovnic

Řešíme soustavu lineárních rovnic.

$$\mathbf{K} * \mathbf{r} = \mathbf{F} \quad (3.45)$$

$$\mathbf{r} = \mathbf{K}^{-1} * \mathbf{F} \quad (3.46)$$

3.5.8 Normálové síly

Normálové síly prutů prostorové příhradové konstrukce jsou lokální koncové síly na jednotlivých prutech.

3.5.9 Kontrola řešení

Řešení můžeme zkontrolovat pomocí podmínek rovnováhy ve styčnicích.

4 Základy nelineární mechaniky

V případě nelineární mechaniky neplatí určité předpoklady, které se používají v lineární mechanice. Neplatí princip superpozice, princip úměrnosti, Hookeův zákon. Nelineární úlohu řešíme posloupností lineárních kroků. Můžeme využít iterační řešení, přírůstkové řešení nebo přírůstkově iterační.

4.1 Typy nelinearit

Nelinearity se dělí na několik typů:

- konstrukční nelinearita
- fyzikální nelinearita
- geometrická nelinearita

4.1.1 Konstrukční nelinearita

Typickým příkladem konstrukční nelinearity jsou prvky působící pouze v tahu nebo tlaku. Lana, která přenášejí tahová zatížení, v případě zatížení tlakem vybočí a nepřenášejí žádné zatížení. Proto se z výpočtu vypustí přiřazením minimální tuhosti. Pokud na ně začnou opět působit tahové síly, znovu se zapojí do přenášení sil.

Druhým příkladem konstrukční nelinearity jsou jednostranné vazby. Například část základu, která není v kontaktu s podložím.

Pro řešení těchto nelinearit můžeme využít iteračního řešení. Nejprve provedeme lineární výpočet. Podle dosažených výsledků rozhodneme, které části konstrukce ve výpočtu “vypnout”. Znovu provedeme lineární výpočet, ale na již změněné konstrukci.

4.1.2 Fyzikální nelinearita

Vlastnosti materiálu nejsou lineárně pružné. V nelineární pružnosti neplatí Hookeův zákon. Při pružnoplastickém chování vznikají nevratné (trvalé) deformace. Může vzniknout také křehké, náhlé porušení, které řeší lomová mechanika.

Pro vyjádření pružnoplastického chování materiálu využíváme různé modely pro chování materiálu. Volíme mezi ideálně pružnoplastickým modelem, pružnoplastickým modelem se zpevněním a tuhoplastickým modelem.

V první části zatěžování se materiál deformuje pružně. Po dosažení meze plasticity se neomezeně plasticky deformuje.

Zpevnění v pružnoplastickém modelu může být kinematické (podmínky plasticity mění polohu), izotropní (velikost podmínek plasticity se proporcionálně zvětšuje) nebo kombinované, které nejlépe odpovídá skutečným látkám.

V tuhoplastickém modelu materiál nemá žádné pružné deformace. Po dosažení meze plasticity se neustále plasticky deformuje. Využívá se pro zjednodušené řešení rámových konstrukcí.

4.1.3 Geometrická nelinearita

V geometricky nelineárních úlohách může docházet ke vzniku velkých deformací (průhyby, pootočení). Další variantou je zavedení teorie 2. řádu, ve které vznikají malé deformace, ale podmínky rovnováhy se sestavují pro deformovanou konstrukci.

V lineární mechanice počítáme pouze s materiálovou tuhostí \mathbf{K} . Pro nelineární řešení se počítá s dalšími maticemi.

- \mathbf{K}_G obsahuje členy z nelineárních prvků v poměrných deformacích. Závisí na aktuální napjatosti. Nazývá se „maticí počátečních napětí“, „geometrickou maticí“ nebo „stabilitní maticí“.
- \mathbf{K}_H vyjadřuje vliv změny výchozího tvaru konstrukce z počátku přírůstku zatížení. Nazývá se maticí „počátečních deformací“.
- \mathbf{K}_R vyjadřuje vliv změny zatížení vlivem změny tvaru konstrukce. Nazývá se maticí „počátečních zatížení“.

V dalším textu se zabýváme pouze geometrickou maticí \mathbf{K}_G , která je uvedena v matici (5.1).

5 Geometrická nelinearita v obecné deformační metodě

5.1 Teorie 2. řádu

Při výpočtu zavádíme teorii 2. řádu. Jak již bylo zmíněno výše, v této teorii počítáme podmínky rovnováhy na zdeformované konstrukci. Respektujeme tedy vzniklá posunutí a pootočení.

Ve výpočtu využíváme geometrickou matici tuhosti (5.1).

$$\mathbf{k}_{ab}^* = \begin{bmatrix} \frac{EA}{l} & 0 & 0 & -\frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{N}{l} & 0 & 0 & -\frac{N}{l} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{N}{l} & 0 & 0 & -\frac{N}{l} \\ -\frac{EA}{l} & 0 & 0 & \frac{EA}{l} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{N}{l} & 0 & 0 & \frac{N}{l} & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{N}{l} & 0 & 0 & \frac{N}{l} \end{bmatrix} \quad (5.1)$$

5.2 Zavedení do výpočtu

Nejprve provedeme výpočet podle teorie 1. řádu. Poté upravíme geometrii konstrukce podle vypočtených deformací. Geometrická nelinearita je zavedena pomocí jednotlivých kroků iterace. V každé iteraci se provádí lineární výpočet příhradové konstrukce pomocí obecné deformační metody. Při výpočtu podle teorie 2. řádu se osově síly určí s využitím následujícího vztahu.

Nově vypočítanou normálovou sílu poté použijeme v geometrické matici tuhosti (5.1).

$$N_i = \frac{E_i * A_i}{L_i} * (L_{N,i} - L_i) \quad (5.2)$$

6 Příklad ocelové příhradové konstrukce rozhledny

6.1 Reálná konstrukce rozhledny

Výpočetní model konstrukce se zakládá na reálné konstrukci rozhledny (obr. 6.1) stojící na severovýchodním úbočí hory Kabátice nad obcí Chlebovice v nadmořské výšce 460 m n. m.

Konstrukce je tvořena rovnostrannými L profily. Svislice a vodorovné pruty jsou ve velikosti 100 x 100 x 8 mm a diagonály ve velikosti 55 x 55 x 5 mm.

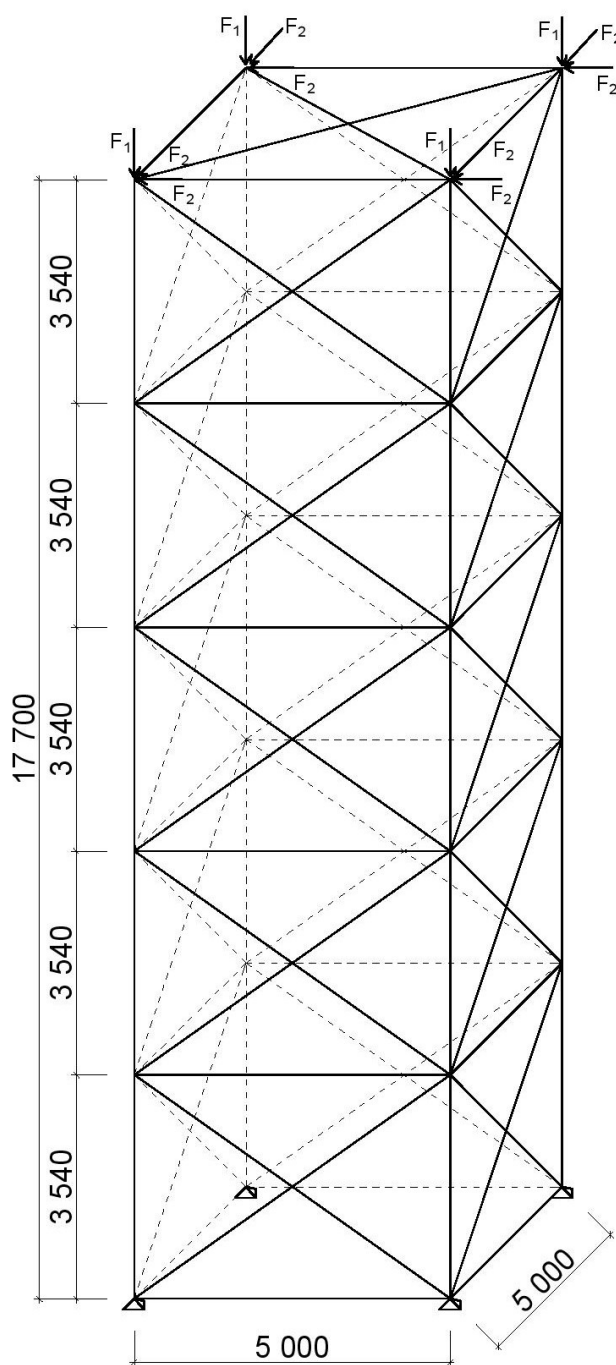
Výhlídková plošina je ve výšce 17,7 m.



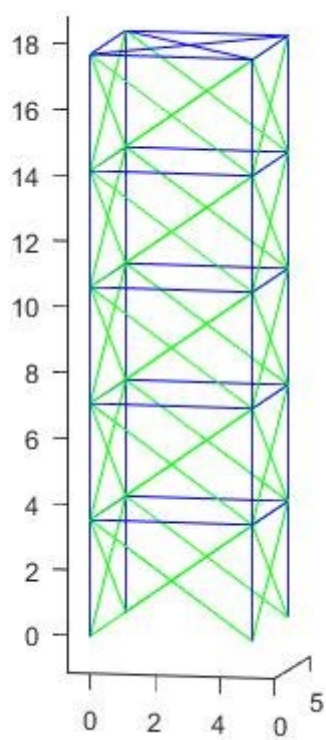
Obr. 6.1 – Reálná konstrukce

6.2 Výpočetní model konstrukce

Řešenou konstrukcí je prostorová příhradová konstrukce. Jedná se o soustavu přímých prutů, které jsou svými konci spojeny ve styčnicích klouby. Pruty mají konstantní průřezy, různé pruty mohou mít různé průřezy. Soustava je zatížena pouze styčnickovým zatížením, tj. bodovými silami v místech kloubů. Soustava je podepřena proti posunutí ve styčnicích vnějšími vazbami. V prutech vznikají pouze normálové síly.

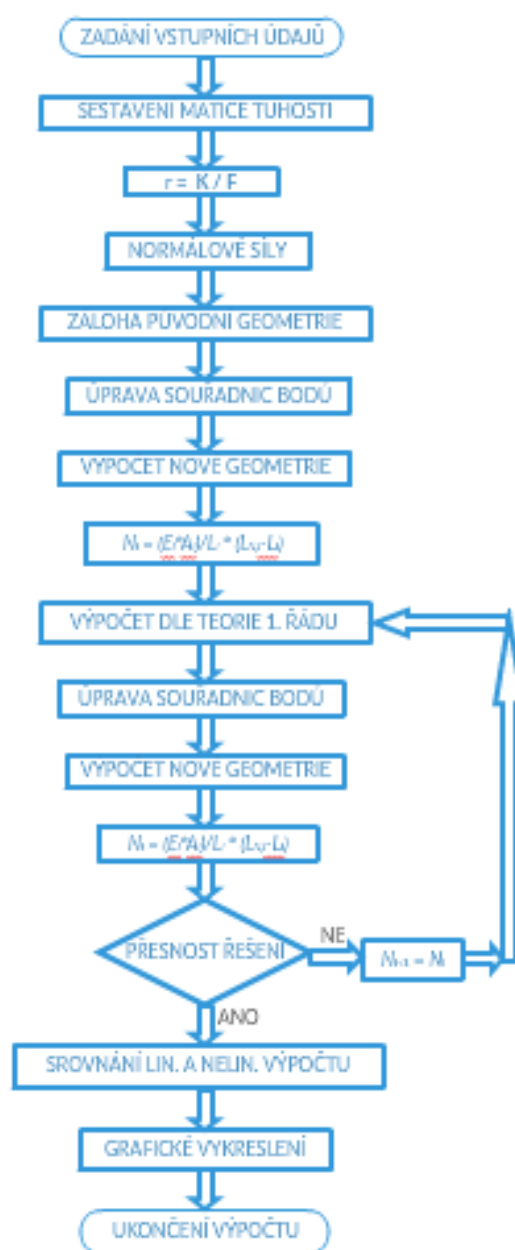


Obr. 6.2 – Výpočetní model konstrukce



Obr. 6.3 – Výpočetní model konstrukce – rozdělení dle plochy průřezu

6.3 Vývojový diagram programu



Obr. 6.4 – Deformovaná konstrukce

6.4 Tvorba programu

6.4.1 Souřadnice uzlů konstrukce

Konstrukce má celkem 24 uzlů. Níže je uveden výpis umístění styčníků v prostoru z algoritmu v Matlabu. Souřadnice jsou uvedeny v metrech.

| ***** | | | |
|---------------------|----------|----------|----------|
| * Souřadnice uzlů * | | | |
| ***** | | | |
| číslo uzlu | x [m] | y [m] | z [m] |
| ----- | | | |
| 1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 2 | 5.000 | 0.000 | 0.000 |
| 3 | 5.000 | 5.000 | 0.000 |
| 4 | 0.000 | 5.000 | 0.000 |
| 5 | 0.000 | 0.000 | 3.540 |
| 6 | 5.000 | 0.000 | 3.540 |
| 7 | 5.000 | 5.000 | 3.540 |
| 8 | 0.000 | 5.000 | 3.540 |
| 9 | 0.000 | 0.000 | 7.080 |
| 10 | 5.000 | 0.000 | 7.080 |
| 11 | 5.000 | 5.000 | 7.080 |
| 12 | 0.000 | 5.000 | 7.080 |
| 13 | 0.000 | 0.000 | 10.620 |
| 14 | 5.000 | 0.000 | 10.620 |
| 15 | 5.000 | 5.000 | 10.620 |
| 16 | 0.000 | 5.000 | 10.620 |
| 17 | 0.000 | 0.000 | 14.160 |
| 18 | 5.000 | 0.000 | 14.160 |
| 19 | 5.000 | 5.000 | 14.160 |
| 20 | 0.000 | 5.000 | 14.160 |
| 21 | 0.000 | 0.000 | 17.700 |
| 22 | 5.000 | 0.000 | 17.700 |
| 23 | 5.000 | 5.000 | 17.700 |
| 24 | 0.000 | 5.000 | 17.700 |

6.4.2 Pruty

Konstrukce má celkem 82 prutů. Jednotlivé pruty jsou připojeny ve svém počátečním a koncovém uzlu. Plochu průřezu lze zadat konkrétní hodnotou pro jeden prut nebo obecně hodnotou A_1 nebo A_2 , které jsou definovány na začátku algoritmu pro více prutů. V případě konstrukce z různých materiálů lze stejně zadat i modul pružnosti.

Níže je uveden výpis z programu Matlab pro svislé pruty o průřezové ploše A_1 a několik diagonálních prutů o průřezové ploše A_2 .

```
*****
*                               *
*                               *
*****
```

počáteční koncový plocha modul

uzel uzel pružnosti

| | | | |
|----|----|----|---|
| 1 | 5 | A1 | 0 |
| 2 | 6 | A1 | 0 |
| 3 | 7 | A1 | 0 |
| 4 | 8 | A1 | 0 |
| 5 | 9 | A1 | 0 |
| 6 | 10 | A1 | 0 |
| 7 | 11 | A1 | 0 |
| 8 | 12 | A1 | 0 |
| 9 | 13 | A1 | 0 |
| 10 | 14 | A1 | 0 |
| 11 | 15 | A1 | 0 |
| 12 | 16 | A1 | 0 |
| 13 | 17 | A1 | 0 |
| 14 | 18 | A1 | 0 |
| 15 | 19 | A1 | 0 |
| 16 | 20 | A1 | 0 |
| 17 | 21 | A1 | 0 |
| 18 | 22 | A1 | 0 |
| 19 | 23 | A1 | 0 |
| 20 | 24 | A1 | 0 |

| | | | |
|---|---|----|---|
| 1 | 6 | A2 | 0 |
|---|---|----|---|

| | | | |
|---|----|----|---|
| 2 | 5 | A2 | 0 |
| 2 | 7 | A2 | 0 |
| 3 | 6 | A2 | 0 |
| 3 | 8 | A2 | 0 |
| 4 | 7 | A2 | 0 |
| 4 | 5 | A2 | 0 |
| 1 | 8 | A2 | 0 |
| 5 | 10 | A2 | 0 |
| 6 | 9 | A2 | 0 |

6.4.3 Vnější vazby

Konstrukce je podepřena v prvních čtyřech styčnicích. Je zamezeno posunutí ve směrech os x , y i z . Je však umožněno volné natáčení prutů připojených v těchto styčnicích jako i ve všech ostatních. Níže je uveden výpis z algoritmu, který ukazuje vždy uzel a směr vazby proti posunutí.

* **Podpory** *

číslo směr
uzlu 1=x,2=y,3=z

| | |
|---|-------|
| 1 | 1.000 |
| 1 | 2.000 |
| 1 | 3.000 |
| 2 | 1.000 |
| 2 | 2.000 |
| 2 | 3.000 |
| 3 | 1.000 |
| 3 | 2.000 |
| 3 | 3.000 |
| 4 | 1.000 |
| 4 | 2.000 |
| 4 | 3.000 |

Pro zavedení podpor do matice tuhosti konstrukce je použit následující část algoritmu.

```
% Podpory:
for i=1:npodpor
    iuz=podpory(i,1);
    ismer=podpory(i,2);
    pos = (ndof*(iu-1))+ismer;
    u(pos) = u(pos)+podpory(i,3);
    for j=1:velikost
        K(pos,j) = 0.0 ;
        K(j,pos) = 0.0 ;
    end
    K(pos,pos) = 1.0 ;
end
```

6.4.4 Zatížení

Konstrukce je zatížena pouze ve styčnicích osamělými silami. Působící zatížení je určeno dle normy [3]. Ve styčnicích působí vlastní tíha, užité zatížení, které představují návštěvníci rozhledny, tíha zastřešení a opláštění vyhlídkové plošiny, sníh a vítr. Velikost zatížení je zadána v kN.

| ***** | | |
|--------------------------|-------------|----------|
| * Uzlová zatížení [kN] * | | |
| ***** | | |
| číslo | směr | velikost |
| uzlu | 1=x,2=y,3=z | |
| <hr/> | | |
| vlastní tíha konstrukce | | |
| 5 | 3.000 | -1.548 |
| 6 | 3.000 | -1.548 |
| 7 | 3.000 | -1.548 |
| 8 | 3.000 | -1.548 |
| 9 | 3.000 | -1.548 |
| 10 | 3.000 | -1.548 |
| 11 | 3.000 | -1.548 |
| 12 | 3.000 | -1.548 |
| 13 | 3.000 | -1.548 |
| 14 | 3.000 | -1.548 |

| | | |
|----|-------|--------|
| 15 | 3.000 | -1.548 |
| 16 | 3.000 | -1.548 |
| 17 | 3.000 | -1.548 |
| 18 | 3.000 | -1.548 |
| 19 | 3.000 | -1.548 |
| 20 | 3.000 | -1.548 |
| 21 | 3.000 | -1.078 |
| 22 | 3.000 | -1.078 |
| 23 | 3.000 | -1.078 |
| 24 | 3.000 | -1.078 |

Užitné zatížení

| | | |
|----|-------|---------|
| 21 | 3.000 | -31.250 |
| 22 | 3.000 | -31.250 |
| 23 | 3.000 | -31.250 |
| 24 | 3.000 | -31.250 |

Vlastní tíha střechy

| | | |
|----|-------|---------|
| 21 | 3.000 | -12.600 |
| 22 | 3.000 | -12.600 |
| 23 | 3.000 | -12.600 |
| 24 | 3.000 | -12.600 |

Zatížení sněhem

| | | |
|----|-------|--------|
| 21 | 3.000 | -8.640 |
| 22 | 3.000 | -8.640 |
| 23 | 3.000 | -8.640 |
| 24 | 3.000 | -8.640 |

Zatížení větrem

| | | |
|----|-------|--------|
| 21 | 1.000 | 18.200 |
| 22 | 1.000 | 18.200 |

Pro zjištění vektoru pravé strany, který je přímo roven styčnickovému zatížení, je využito skriptu níže.

```
% Zatizeni:
for i=1:nsil
    iuz=sily(i,1);
    ismer=sily(i,2);
    pos = (ndof*(iuz-1))+ismer;
    F(pos) = F(pos)+sily(i,3);
end
```

6.4.5 Matice tuhosti

Pro sestavení matice tuhosti využíváme kódová čísla.

```
% Vypocet kodovych cisel:
kcis=zeros(nprutu,ndof*puzlu);
for i=1:nprutu
    for j=1:puzlu
        for k=1:ndof
            kcis(i,((j-1)*ndof+k))=(pruty(i,j)-1)*ndof+k;
        end
    end
end
end
```

Poté určíme délky a natočení jednotlivých prutů. Určíme lokální matice tuhosti pro jednotlivé pruty, které transformujeme do globálního souřadného systému. Jednotlivé matice tuhostí prutů přičteme do celkové matice tuhosti konstrukce.

```
% Sestaveni a lokalizace matic tuhosti:
for i=1:nprutu
    % Delka prutu
    dx = (uzly(pruty(i,2),1)-uzly(pruty(i,1),1));
    dy = (uzly(pruty(i,2),2)-uzly(pruty(i,1),2));
    dz = (uzly(pruty(i,2),3)-uzly(pruty(i,1),3));
    L = sqrt(dx^2 + dy^2 + dz^2);
    A=pruty(i,3);
```



```
%Vypocet lokalni matice tuhosti Kab* pro jednotlivé
pruty
```

```
Kabl=[E*A/L      0      0      -(E*A)/L      0      0;
      0      N/L 0      0      -N/L      0;
      0      0      N/L      0      0      -N/L;
      -(E*A)/L      0      0      (E*A)/L      0      0;
      0      -N/L 0      0      N/L      0;
      0      0      -N/L      0      0      N/L];
```

```
% Transformacni matice:
```

```
a = dx/L;      %cosin alfa
b = dy/L;      %cosin beta
c = dz/L;      %cosin gama
```

```
Tab = [ a b c 0 0 0 ;
        0 0 0 0 0 0 ;
        0 0 0 0 0 0 ;
        0 0 0 a b c ;
        0 0 0 0 0 0 ;
        0 0 0 0 0 0 ] ;
```

```
% Globalni matice tuhosti Kab pro jednotlivé pruty:
```

```
Kab=Tab'*Kabl*Tab;
```

```
% Celková matice tuhosti K:
```

```
for j=1:(puzlu*ndof)
```

```
    for k=1:(puzlu*ndof)
```

```
        K(kcis(i,j),kcis(i,k))=
```

```
        K(kcis(i,j),kcis(i,k))+Kab(j,k);
```

```
    end
```

```
end
```

```
end
```

6.4.6 Řešení soustavy rovnic

Řešíme soustavu lineárních rovnic.

```
% Reseni soustavy rovnic:  
r=K\F;
```

6.4.7 Osové síly

```
% Vypocet vysledku na prutech:  
for i=1:nprutu  
    re = zeros(puzlu*ndof,1);  
  
    % Ziskani lokalnich vektoru deformaci:  
    for j=1:(puzlu*ndof)  
        re(j) = r(kcis(i,j));  
    end  
  
    % Transformace:  
    dx = (uzly(pruty(i,2),1)-uzly(pruty(i,1),1));  
    dy = (uzly(pruty(i,2),2)-uzly(pruty(i,1),2));  
    dz = (uzly(pruty(i,2),3)-uzly(pruty(i,1),3));  
    L = sqrt(dx^2 + dy^2 + dz^2);  
    a = dx/L;      %cosin alfa  
    b = dy/L;      %cosin beta  
    c = dz/L;      %cosin gama  
  
    Tab = [ a b c 0 0 0 ;  
           0 0 0 0 0 0 ;  
           0 0 0 0 0 0 ;  
           0 0 0 a b c ;  
           0 0 0 0 0 0 ;  
           0 0 0 0 0 0 ] ;  
  
    rel = Tab * re;  
    %Lokalni matice tuhosti:  
    A = pruty(i,3);
```

```

Kab1=[E*A/L      0      0      -(E*A)/L      0      0;
      0      N/L 0      0      -N/L 0;
      0      0      N/L 0      0      -N/L;
      -(E*A)/L      0      0      (E*A)/L      0      0;
      0      -N/L 0      0      N/L 0;
      0      0      -N/L 0      0      N/L];

%Sily v prutech:
Fe = Kab1 * rel;
N = Fe(1);
end

```

6.4.8 Změna geometrie

Nejprve se provede záloha původní geometrie. Poté k původně zadané geometrii přičteme složky deformací a vypočítáme nové délky prutů a jejich natočení.

```

uzly_1=uzly;
L_puv;
N_puv;
N_1=N_puv;

%Uprava souradnic bodu
for i=1:1:nuzlu
    uzly(i,1)=uzly_1(i,1)+r((i-1)*2+i);
    uzly(i,2)=uzly_1(i,2)+r((i-1)*2+i+1);
    uzly(i,3)=uzly_1(i,3)+r((i-1)*2+i+2);
end

% Vypocet nove geometrie
for i=1:1:nprutu
    dx = (uzly(pruty(i,2),1)-uzly(pruty(i,1),1));
    dy = (uzly(pruty(i,2),2)-uzly(pruty(i,1),2));
    dz = (uzly(pruty(i,2),3)-uzly(pruty(i,1),3));

    L(i) = sqrt(dx^2 + dy^2 + dz^2);

    a = dx/L(i);      %cosin alfa

```

```

        b = dy/L(i);          %cosin beta
        c = dz/L(i);          %cosin gama
    end

```

6.4.9 Výpočet normálových sil dle teorie 2. řádu

Pro výpočet normálových sil dle teorie 2. řádu využíváme skriptu níže.

```

for i=1:1:nprutu
    N_nove(i)=
        -(E*pruty(i,3))/L_puv(i)*(L(i)-L_puv(i));
end

```

Lineární výpočet opakujeme, dokud nedosáhneme požadované přesnosti.

```

while (norm(N_puv-N_nove))>1e-7

```

6.4.10 Deformovaná konstrukce

Velikost deformace je pro viditelnost zvětšena podle rovnice níže.

$$g_{mult} = 0,025 * \max(uzly(:))/\max(r) \quad (6.1)$$

Nejprve je vykreslena původní konstrukce zelenou barvou a poté je do stejného obrázku vkreslena deformovaná konstrukce růžovou barvou.

Cyklus pro vykreslení původní a deformované konstrukce je doplněn o podmínku zjišťující průřezovou plochu prutu. Je možné tedy vykreslit diagonály ještě další jinou barvou.

```

% Grafika - vykreslení konstrukce:
hold on
for i=1:nprutu
    if pruty(i,3) > A2
        plot3(souradnice(:,1,i),souradnice(:,2,i),souradnice(:,3,i),'-g');
    else
        plot3(souradnice(:,1,i),souradnice(:,2,i),souradnice(:,3,i),'-g');
    end
end
end

```

```

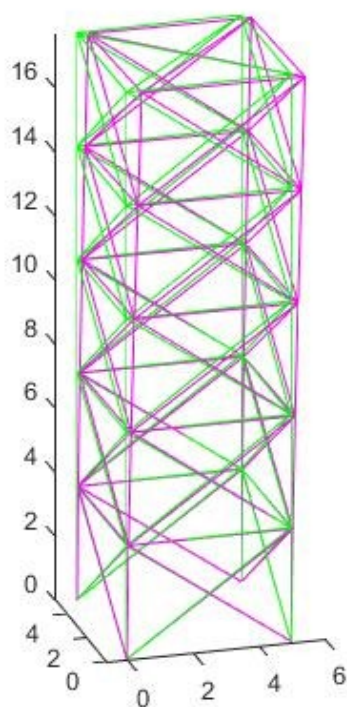
% Grafika - vykresleni deformovane konstrukce:
for i=1:nprutu
    if pruty(i,3) > A2

        plot3(souradnicedef(:,1,i),souradnicedef(:,2,i),s
            ouradnicedef(:,3,i),'-m');
    else

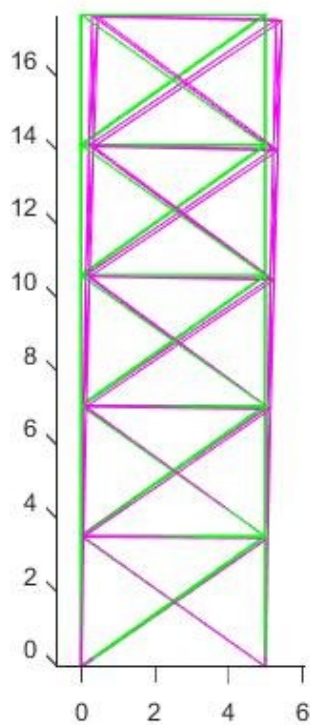
        plot3(souradnicedef(:,1,i),souradnicedef(:,2,i),soura
            dnicedef(:,3,i),'-m');
    end
end
hold off

```

Na obrázku č. 6.5 a č. 6.6 je znázorněna konstrukce v původním stavu zelenou barvou a deformované pruty růžovou barvou.



Obr. 6.5 – Deformovaná konstrukce

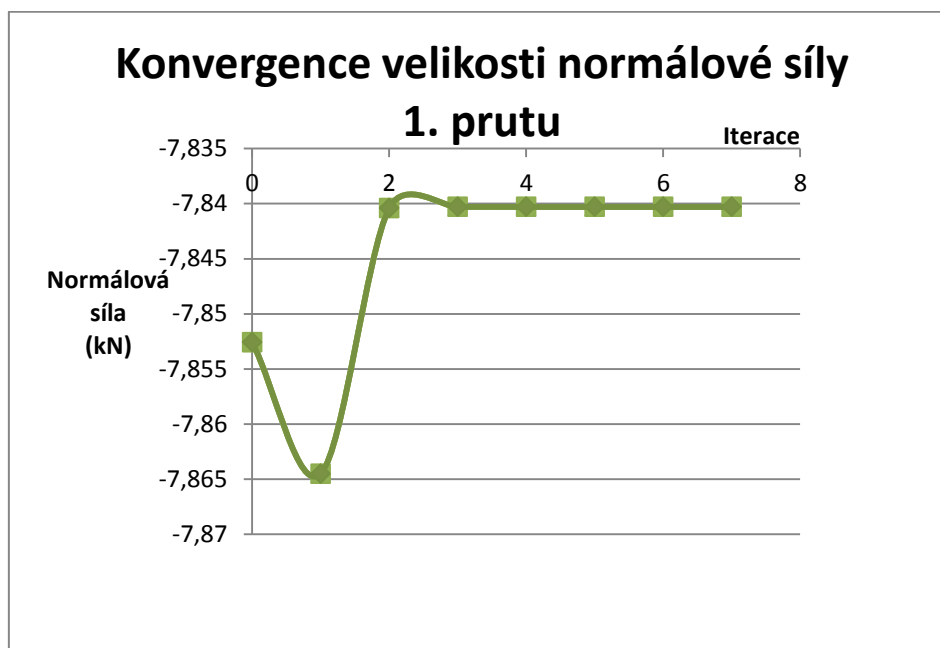


Obr. 6.6 – Deformovaná konstrukce ze strany

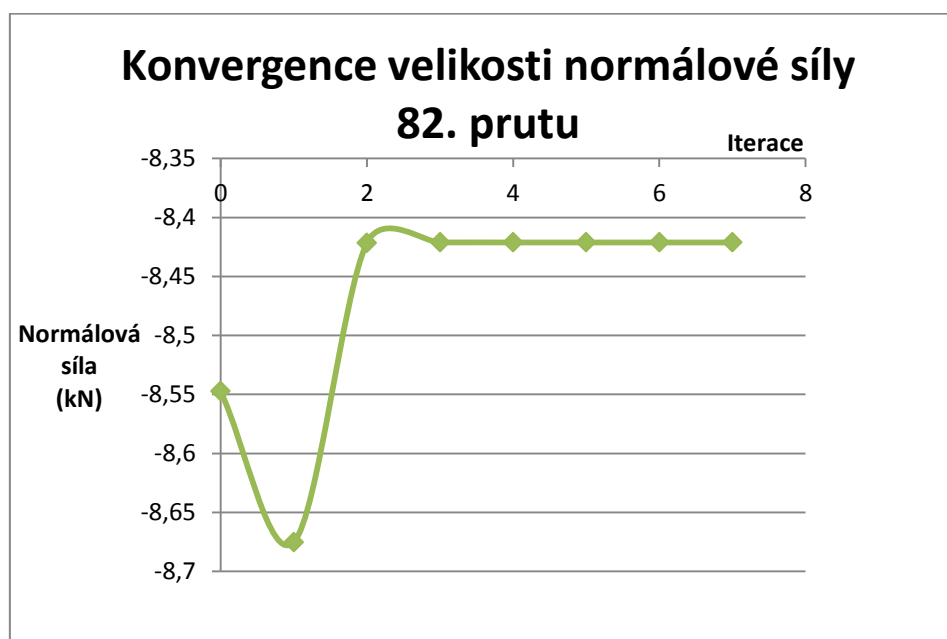
6.5 Porovnání lineárního a nelineárního výpočtu

Pro případ ocelové příhradové konstrukce s přesností výsledků $\xi = 10^{-7}$ je potřeba sedmi iterací. Výsledky normálových sil z lineárního a nelineárního výpočtu se ve většině prutů liší o 1 - 3%. V případě prutu č. 24 je rozdíl 25,3%, v přepočtu na Newtony je rozdíl 218N.

Zadaná ocelová konstrukce je tedy dostatečně tuhá. V tomto konkrétním případě bychom nelineární výpočet nemuseli použít.



Graf 6.1 – Konvergence velikosti normálové síly prvního prutu



Graf. 6.2 – Konvergence velikosti normálové síly posledního prutu

| Porovnání výsledků lineárního a nelineárního výpočtu | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------------|
| Číslo prutu | N (kN) lineární | N (kN) nelineární | rozdíl (%) |
| 1 | -7,8526 | -7,8403 | -0,1563 |
| 2 | -15,1675 | -15,1935 | -0,1715 |
| 3 | -7,8526 | -7,8296 | -0,2920 |
| 4 | -0,5376 | -0,5038 | -6,2979 |
| 5 | -7,0911 | -7,0512 | -0,5631 |
| 6 | -12,0614 | -12,0647 | 0,0268 |
| 7 | -7,0911 | -7,0395 | -0,7281 |
| 8 | -2,1208 | -2,0828 | -1,7888 |
| 9 | -6,9158 | -6,8388 | -1,1132 |
| 10 | -10,2663 | -10,2451 | -0,2060 |
| 11 | -6,9158 | -6,8279 | -1,2713 |
| 12 | -3,5653 | -3,5145 | -1,4238 |
| 13 | -7,0558 | -6,9400 | -1,6420 |
| 14 | -8,6991 | -8,6439 | -0,6341 |
| 15 | -7,0558 | -6,9314 | -1,7635 |
| 16 | -5,4126 | -5,3424 | -1,2978 |
| 17 | -2,1442 | -1,9855 | -7,3994 |
| 18 | -2,5310 | -2,4399 | -3,5993 |
| 19 | -2,1442 | -1,9827 | -7,5291 |
| 20 | -1,7573 | -1,6629 | -5,3721 |
| 21 | -1,4289 | -1,6230 | 13,5857 |
| 22 | 108,8231 | 109,0459 | 0,2047 |
| 23 | 108,2562 | 108,4549 | 0,1835 |
| 24 | -0,8621 | -1,0804 | 25,3221 |
| 25 | 9,8720 | 9,7516 | -1,2195 |
| 26 | 96,4394 | 96,6765 | 0,2459 |
| 27 | 95,9985 | 96,1870 | 0,1963 |
| 28 | 10,3129 | 10,1445 | -1,6329 |
| 29 | 20,7905 | 20,7534 | -0,1787 |
| 30 | 82,5681 | 82,8038 | 0,2854 |
| 31 | 82,2532 | 82,4277 | 0,2121 |
| 32 | 21,1054 | 21,0078 | -0,4624 |
| 33 | 31,7746 | 31,8181 | 0,1369 |
| 34 | 68,8413 | 69,0549 | 0,3102 |
| 35 | 68,6524 | 68,8024 | 0,2185 |
| 36 | 31,9635 | 31,9441 | -0,0608 |
| 37 | 42,1846 | 42,2991 | 0,2716 |
| 38 | 54,5854 | 54,7515 | 0,3044 |
| 39 | 54,5224 | 54,6332 | 0,2030 |
| 40 | 42,2476 | 42,3069 | 0,1405 |
| 41 | -11,5058 | -11,5281 | 0,1931 |
| 42 | 21,9983 | 22,0300 | 0,1442 |

| Porovnání výsledků lineárního a nelineárního výpočtu | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------------|
| Číslo prutu | N (kN) lineární | N (kN) nelineární | rozdíl (%) |
| 43 | 5,1371 | 5,1415 | 0,1536 |
| 44 | 16,2325 | 16,2649 | 0,1995 |
| 45 | 10,7939 | 10,8126 | 0,1703 |
| 46 | -0,3015 | -0,3152 | 4,5562 |
| 47 | -5,7401 | -5,7583 | 0,3182 |
| 48 | 5,3553 | 5,3353 | -0,3745 |
| 49 | -12,3768 | -12,4009 | 0,1942 |
| 50 | 21,1273 | 21,1798 | 0,2486 |
| 51 | 2,3516 | 2,3574 | 0,2459 |
| 52 | 13,4470 | 13,4816 | 0,2569 |
| 53 | 9,9229 | 9,9605 | 0,3784 |
| 54 | -1,1725 | -1,1899 | 1,4879 |
| 55 | -4,6966 | -4,7010 | 0,0933 |
| 56 | 6,3988 | 6,3877 | -0,1742 |
| 57 | -12,4388 | -12,4597 | 0,1681 |
| 58 | 21,0653 | 21,1385 | 0,3475 |
| 59 | 1,3314 | 1,3376 | 0,4681 |
| 60 | 12,4268 | 12,4706 | 0,3530 |
| 61 | 9,8609 | 9,9180 | 0,5787 |
| 62 | -1,2345 | -1,2503 | 1,2870 |
| 63 | -3,8003 | -3,7892 | -0,2926 |
| 64 | 7,2951 | 7,2898 | -0,0721 |
| 65 | -12,5917 | -12,6057 | 0,1113 |
| 66 | 20,9125 | 21,0026 | 0,4311 |
| 67 | 0,1521 | 0,1570 | 3,2164 |
| 68 | 11,2475 | 11,3013 | 0,4787 |
| 69 | 9,7081 | 9,7817 | 0,7580 |
| 70 | -1,3873 | -1,3971 | 0,7091 |
| 71 | -2,9267 | -2,8969 | -1,0169 |
| 72 | 8,1687 | 8,1702 | 0,0180 |
| 73 | -12,2672 | -12,2718 | 0,0378 |
| 74 | 21,2369 | 21,3390 | 0,4808 |
| 75 | -0,5888 | -0,5856 | -0,5392 |
| 76 | 10,5066 | 10,5688 | 0,5922 |
| 77 | 10,0325 | 10,1192 | 0,8641 |
| 78 | -1,0628 | -1,0644 | 0,1517 |
| 79 | -1,5368 | -1,4873 | -3,2206 |
| 80 | 9,5585 | 9,5672 | 0,0906 |
| 81 | 4,2590 | 4,3858 | 2,9754 |
| 82 | -8,5474 | -8,4212 | 1,4765 |

Tab. 6.1 – Porovnání velikosti normálových sil

7 Příklad nahrazení ocelové příhradové konstrukce rozhledny konstrukcí dřevěnou

Konstrukce je tvořena dřevěnými sloupky, vodorovnými trámkami a dřevěnými diagonálami. Svislice a vodorovné pruty jsou ve velikosti 120 x 120 mm a diagonály ve velikosti 60 x 60 mm.

7.1 Provedené změny v algoritmu pro dřevěnou konstrukci

V algoritmu došlo pouze ke změně zadání a to: průřezové plochy prutů, modul pružnosti v tahu a tlaku, zatížení vlastní tíhou.

| | | | |
|-----------------------------------|----------------------|----------|---|
| ***** | | | |
| * | Uzlová zatížení [kN] | | * |
| ***** | | | |
| číslo | směr | velikost | |
| uzlu | 1=x,2=y,3=z | | |
| Zatížení vlastní tíhou konstrukce | | | |
| 5 | 3.000 | -1.168 | |
| 6 | 3.000 | -1.168 | |
| 7 | 3.000 | -1.168 | |
| 8 | 3.000 | -1.168 | |
| 9 | 3.000 | -1.168 | |
| 10 | 3.000 | -1.168 | |
| 11 | 3.000 | -1.168 | |
| 12 | 3.000 | -1.168 | |
| 13 | 3.000 | -1.168 | |
| 14 | 3.000 | -1.168 | |
| 15 | 3.000 | -1.168 | |
| 16 | 3.000 | -1.168 | |
| 17 | 3.000 | -1.168 | |
| 18 | 3.000 | -1.168 | |
| 19 | 3.000 | -1.168 | |
| 20 | 3.000 | -1.168 | |
| 21 | 3.000 | -0.836 | |
| 22 | 3.000 | -0.836 | |
| 23 | 3.000 | -0.836 | |

| | | |
|----|-------|--------|
| 24 | 3.000 | -0.836 |
|----|-------|--------|

Užitné zatížení

| | | |
|----|-------|---------|
| 21 | 3.000 | -31.250 |
|----|-------|---------|

| | | |
|----|-------|---------|
| 22 | 3.000 | -31.250 |
|----|-------|---------|

| | | |
|----|-------|---------|
| 23 | 3.000 | -31.250 |
|----|-------|---------|

| | | |
|----|-------|---------|
| 24 | 3.000 | -31.250 |
|----|-------|---------|

Vlastní tíha střechy

| | | |
|----|-------|---------|
| 21 | 3.000 | -12.600 |
|----|-------|---------|

| | | |
|----|-------|---------|
| 22 | 3.000 | -12.600 |
|----|-------|---------|

| | | |
|----|-------|---------|
| 23 | 3.000 | -12.600 |
|----|-------|---------|

| | | |
|----|-------|---------|
| 24 | 3.000 | -12.600 |
|----|-------|---------|

Zatížení sněhem

| | | |
|----|-------|--------|
| 21 | 3.000 | -8.640 |
|----|-------|--------|

| | | |
|----|-------|--------|
| 22 | 3.000 | -8.640 |
|----|-------|--------|

| | | |
|----|-------|--------|
| 23 | 3.000 | -8.640 |
|----|-------|--------|

| | | |
|----|-------|--------|
| 24 | 3.000 | -8.640 |
|----|-------|--------|

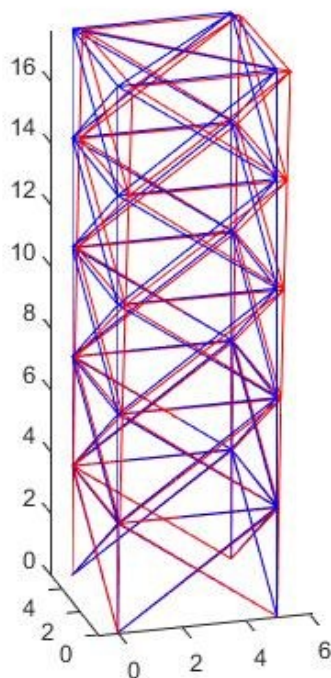
Zatížení větrem

| | | |
|----|-------|--------|
| 21 | 1.000 | 18.200 |
|----|-------|--------|

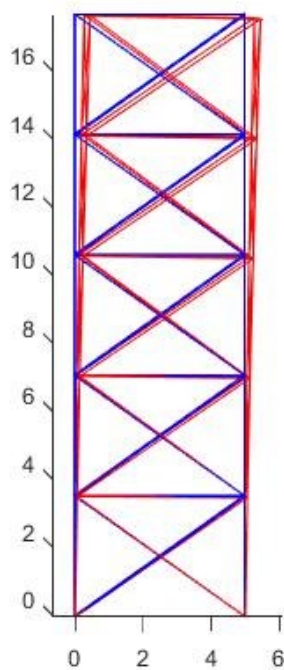
| | | |
|----|-------|--------|
| 22 | 1.000 | 18.200 |
|----|-------|--------|

7.2 Deformovaná konstrukce

Na obrázku č. 7.1 a č. 7.2 je znázorněna konstrukce v původním stavu modrou barvou a deformované pruty červenou barvou.



Obr. 7.1 – Deformovaná konstrukce

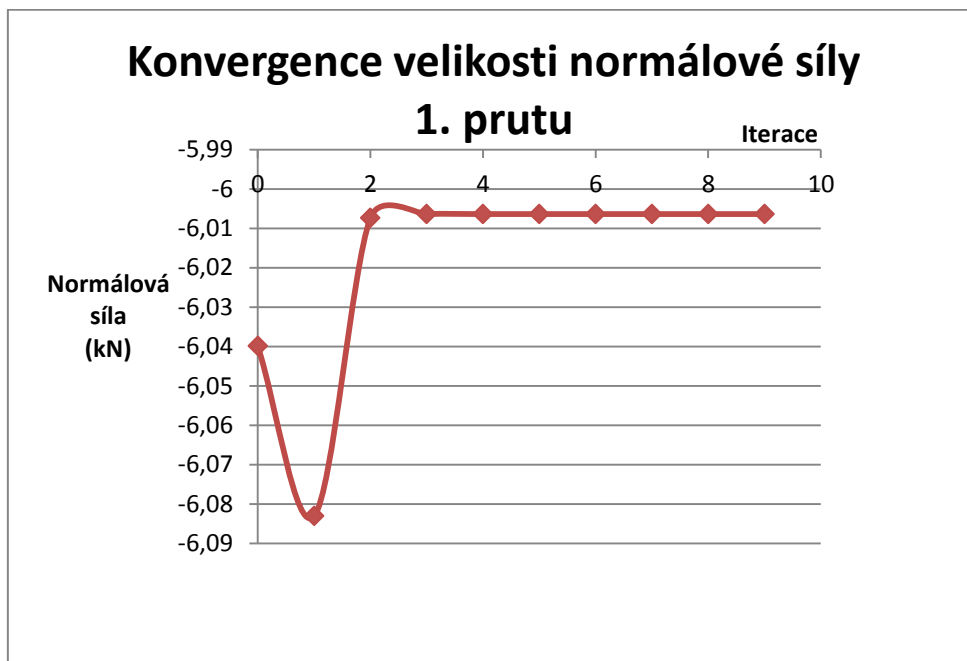


Obr. 7.2 – Deformovaná konstrukce

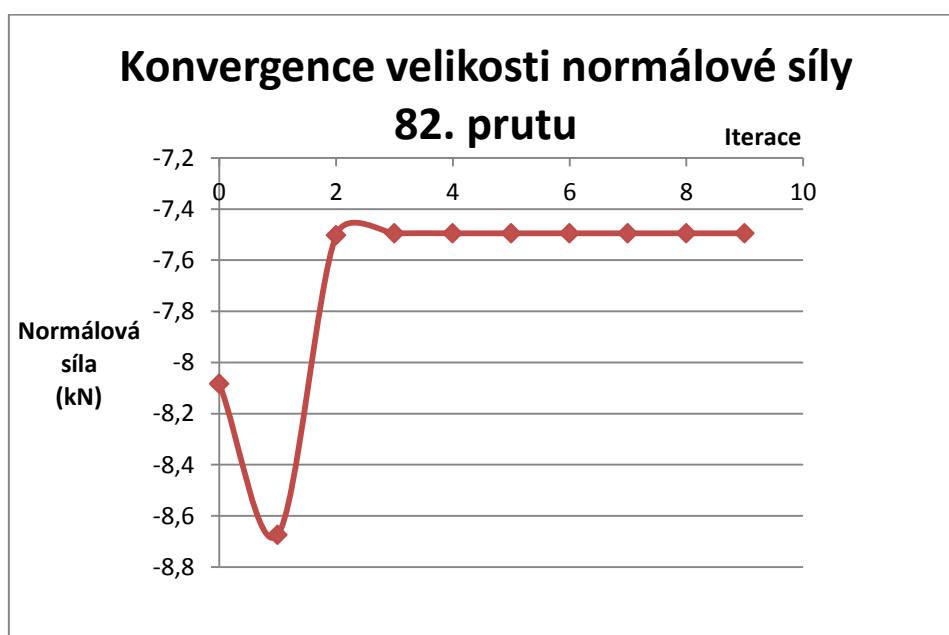
7.3 Porovnání lineárního a nelineárního výpočtu

Pro případ dřevěné příhradové konstrukce s přesností výsledků $\xi = 10^{-7}$ bylo potřeba devíti iterací. Výsledky normálových sil vypočítaných dle lineárního a nelineárního výpočtu se ve většině prutů liší o přibližně 10%. V případě prutů č. 17 - 21 je rozdíl 20 - 40%, v přepočtu na Newtony je rozdíl přibližně 500 - 700N.

Zadaná dřevěná konstrukce je tedy méně tuhá než ocelová konstrukce v předchozím případě.



Graf 7.1 – Konvergence velikosti normálové síly prvního prutu



Graf 7.2 – Konvergence velikosti normálové síly posledního prutu

| Porovnání výsledků lineárního a nelineárního výpočtu | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------------|
| Číslo prutu | N (kN) lineární | N (kN) nelineární | rozdíl (%) |
| 1 | -6,0399 | -6,0064 | -0,5556 |
| 2 | -11,7430 | -11,7986 | 0,4738 |
| 3 | -6,0399 | -0,2441 | -1,2629 |
| 4 | -0,3369 | -5,4443 | -27,5448 |
| 5 | -5,5837 | -9,5207 | -2,4977 |
| 6 | -9,5517 | -5,3981 | -0,3252 |
| 7 | -5,5837 | -1,4800 | -3,3249 |
| 8 | -1,6157 | -5,1839 | -8,4012 |
| 9 | -5,4747 | -7,9906 | -5,3117 |
| 10 | -8,1371 | -5,1395 | -1,8000 |
| 11 | -5,4747 | -2,5916 | -6,1228 |
| 12 | -2,8123 | -5,1007 | -7,8505 |
| 13 | -5,5660 | -5,5711 | -8,3599 |
| 14 | -6,8779 | -6,5711 | -4,4610 |
| 15 | -5,6600 | -5,0631 | -9,0346 |
| 16 | -4,2541 | -3,9093 | -8,1043 |
| 17 | -1,6779 | -1,0009 | -40,3482 |
| 18 | -1,9913 | -1,5037 | -24,4838 |
| 19 | -1,6779 | -0,9864 | -41,2139 |
| 20 | -1,3645 | -0,8685 | -36,3514 |
| 21 | -2,4186 | -2,9948 | -23,8198 |
| 22 | 109,2693 | 110,0374 | 0,7029 |
| 23 | 108,7389 | 109,3889 | 0,5977 |
| 24 | -1,8883 | -2,5826 | 36,7733 |
| 25 | 9,1756 | 8,8610 | -3,4292 |
| 26 | 96,5246 | 97,3508 | 0,8559 |
| 27 | 96,1121 | 96,7206 | 0,6331 |
| 28 | 9,5881 | 9,0577 | -5,5322 |
| 29 | 20,5520 | 20,5145 | -0,1824 |
| 30 | 82,9186 | 83,7471 | 0,9991 |
| 31 | 82,6240 | 83,1822 | 0,6756 |
| 32 | 20,8466 | 20,5413 | -1,4645 |
| 33 | 31,9587 | 32,1809 | 0,6953 |
| 34 | 69,3783 | 70,1385 | 1,0958 |
| 35 | 69,2015 | 69,6806 | 0,6924 |
| 36 | 32,1355 | 32,0784 | -0,1775 |
| 37 | 43,0197 | 43,4621 | 1,0284 |
| 38 | 55,5205 | 56,1291 | 1,0963 |
| 39 | 55,4615 | 55,8210 | 0,6481 |
| 40 | 43,0786 | 433,2722 | 0,4494 |
| 41 | -12,7936 | -12,8740 | 0,6287 |
| 42 | 20,7070 | 20,8224 | 0,5571 |

| Porovnání výsledků lineárního a nelineárního výpočtu | | | |
|---|------------------------|--------------------------|-------------------|
| Číslo prutu | N (kN) lineární | N (kN) nelineární | rozdíl (%) |
| 43 | 2,5718 | 2,5754 | 0,1398 |
| 44 | 13,6707 | 13,7742 | 0,7572 |
| 45 | 9,5061 | 9,5662 | 0,6322 |
| 46 | -1,5927 | -1,6382 | 2,8551 |
| 47 | -5,7572 | -5,7968 | 0,6875 |
| 48 | 5,3416 | 5,2950 | -0,8731 |
| 49 | -13,3065 | -13,3966 | 0,6767 |
| 50 | 20,1941 | 20,3686 | 0,8643 |
| 51 | 0,7175 | 0,7205 | 0,4182 |
| 52 | 11,8164 | 11,9279 | 0,9438 |
| 53 | 8,9932 | 9,1079 | 1,2751 |
| 54 | -2,1057 | -2,1664 | 2,8823 |
| 55 | -4,9289 | -4,9339 | 0,1027 |
| 56 | 6,1700 | 6,1470 | -0,3733 |
| 57 | -13,3525 | -13,4359 | 0,6247 |
| 58 | 20,1481 | 20,3815 | 1,1584 |
| 59 | -0,1130 | -0,1054 | -6,7475 |
| 60 | 10,9858 | 11,1239 | 1,2569 |
| 61 | 8,9472 | 9,1173 | 1,9008 |
| 62 | -2,1517 | -2,2106 | 2,7404 |
| 63 | -4,1903 | -4,1516 | -0,9227 |
| 64 | 6,9086 | 6,9049 | -0,0534 |
| 65 | -13,4401 | -13,5041 | 0,4761 |
| 66 | 20,0605 | 20,3443 | 1,4148 |
| 67 | -1,0158 | -1,0051 | -1,0503 |
| 68 | 10,0831 | 10,2530 | 1,6852 |
| 69 | 8,8596 | 9,0792 | 2,4783 |
| 70 | -2,2392 | -2,2812 | 1,8727 |
| 71 | -3,4627 | -3,3702 | -2,6727 |
| 72 | 7,6362 | 7,6554 | 0,2527 |
| 73 | -13,2407 | -13,2743 | 0,2535 |
| 74 | 20,2599 | 20,5833 | 1,5960 |
| 75 | -1,6559 | -1,6404 | -0,9326 |
| 76 | 9,4430 | 9,6435 | 2,1229 |
| 77 | 9,0590 | 9,3212 | 2,8941 |
| 78 | -2,0398 | -2,0541 | 0,7004 |
| 79 | -2,4238 | -2,2729 | -6,2270 |
| 80 | 8,6751 | 8,7207 | 0,5263 |
| 81 | 4,7273 | 5,3154 | 12,4402 |
| 82 | -8,0832 | -7,4948 | -7,2785 |

Tab. 7.1 – Porovnání velikosti normálových sil

8 Závěr

Cílem mé bakalářské práce bylo vytvořit algoritmus pro výpočet prostorové příhradové konstrukce se zahrnutím vlivu geometrické nelinearity. Pro výpočet byla využita obecná deformační metoda.

Ve třetí kapitole je popsána obecná deformační metoda obecně pro rovinné konstrukce, rovinné příhradové konstrukce a následně prostorové příhradové konstrukce. Je naznačena tvorba výpočetního modelu konstrukce, postup výpočtu (určení stupně přetvárné neurčitosti, vektory koncových sil, matice tuhosti, transformační matice, řešení rovnic).

Čtvrtá kapitola se zabývá základy nelineární mechaniky. Jsou v ní uvedeny příklady konstrukční, fyzikální i geometrické nelinearity.

Pátá kapitola rozvádí problematiku geometrické nelinearity. Konkrétně teorii 2. řádu a její zavedení do výpočtu.

Šestá a sedmá kapitola se zabývá ocelovou a dřevěnou prostorovou příhradovou konstrukcí. Výpočet normálových sil podle teorie 1. a 2. řádu je proveden numericky v programu Matlab. Cílem vytvoření programu bylo urychlení a zjednodušení výpočtu normálových sil. Automaticky se vypočítají normálové síly podle teorie 1. i 2. řádu během několika vteřin. Změnou zadání (geometrie konstrukce, materiálu, zatížení) je možné algoritmus použít pro jakoukoliv prostorovou příhradovou konstrukci z oceli nebo ze dřeva.

Vytvořený algoritmus může usnadnit práci při výpočtech prostorových příhradových konstrukcí. Dle mého názoru je numerický výpočet ve srovnání s výpočtem analytickým mnohem rychlejší a snazší.

Při vypracování bakalářské práce jsem mohla zdokonalit své programovací schopnosti.

Vytvořený algoritmus by mohl být rozšířen o výpočet kritického zatížení pro ztrátu stability konstrukce.

Poděkování

Ráda bych poděkovala vedoucí mé bakalářské práce Ing. Lenka Koubová, Ph.D. za podporu během zpracovávání a především za komentáře při jejím dokončování. Díky tomu jsem mohla bakalářskou práci dokončit a v mnohém vylepšit.

Seznam použité literatury

Tištěné zdroje

- [1] BENDA, J. *Statika stavebních konstrukcí II*. CERM, s.r.o. Brno, 1994, ISBN 80-7204-025-1.
- [2] KADLČÁK, J., KYTÝR, J. *Statika stavebních konstrukcí II*. VUTIUM, Brno, 2001.
- [3] ČSN EN 1991-1-1 Eurokód 1: Zatížení konstrukcí – Část 1-1: Obecná zatížení – Objemové tíhy, vlastní tíha a užitná zatížení pozemních staveb, ČNI.

Elektronické zdroje

- [4] KOUBOVÁ, Lenka, *Statika stavebních konstrukcí II*. [Online]. Ostrava. [cit.3.4.2018].
Dostupné z fast10.vsb.cz: http://fast10.vsb.cz/koubova/SSKII_KCE.html
- [5] BROŽOVSKÝ, Jiří, *Nelineární mechanika* [Online]. Ostrava. [cit.3.4.2018].
Dostupné z fast10.vsb.cz: <http://fast10.vsb.cz/brozovsky/nlmech.html>
- [6] KREJSA, Martin, *Speciální numerické metody* [Online]. Ostrava. [cit.3.4.2018].
Dostupné z fast10.vsb.cz: http://fast10.vsb.cz/krejsa/spec_num.htm
- [7] Matlab. Programový systém pro provádění matematických výpočtů. Komerční software, verze R2017a. [on-line]. Dostupné z: <https://www.mathworks.com/>

Seznam příloh

Příloha I. – Algoritmus pro výpočet ocelové příhradové konstrukce se zahrnutím vlivu geometrické nelinearity

Příloha II. – Algoritmus pro výpočet dřevěné příhradové konstrukce se zahrnutím vlivu geometrické nelinearity